

离子色谱法与酶比色法在婴幼儿配方乳粉胆碱检测中的对比研究

高星¹, 赵丹², 张浩², 屠锦娣¹, 杨维静², 梁斌², 张莉¹, 侯国峰^{1*}

(1. 陕西科仪阳光检测技术服务有限公司, 陕西西安 710000; 2. 陕西圣唐乳业有限公司, 陕西渭南 711700)

摘要: [目的]对比评估离子色谱法与酶比色法在婴幼儿配方乳粉胆碱检测中的应用, 选择一种更适用于企业质量控制的检测方法。[方法]通过对比标准曲线、检出限、精密度、准确度、不确定度评定及检测成本等指标, 对离子色谱法和酶比色法进行分析。[结果]离子色谱法和酶比色法在各自的浓度范围内均表现出良好的线性关系, 相关系数(R^2)分别为0.999 7和0.999 1; 离子色谱法的检出限和定量限分别为0.7 mg/100 g和2.1 mg/100 g, 酶比色法的检出限和定量限分别为0.9 mg/100 g和2.7 mg/100 g; 离子色谱法和酶比色法的回收率范围分别为90.7%~102.7%和86.0%~100.6% (加标量在3 mg/100 g~150 mg/100 g时); 离子色谱法的精密度(0.61%~3.83%)优于酶比色法(1.30%~5.85%); 离子色谱法和酶比色法的扩展不确定度分别为4.02%和4.04%。[结论]离子色谱法在灵敏度、精密度和检测成本方面均优于酶比色法, 更适用于婴幼儿配方乳粉中胆碱的定性和定量分析, 建议作为企业检测的首选方法。

关键词: 食品检验; 胆碱; 离子色谱法; 酶比色法; 婴幼儿配方乳粉

文章编号: 1671-4393 (2026) 02-0074-07

DOI:10.12377/1671-4393.26.02.12

A Comprehensive Study of Ion Chromatography and Enzymatic Colorimetry in the Determination of Choline in Infant Formula

GAO Xing¹, ZHAO Dan², ZHANG Hao², TU Jindi¹, YANG Weijing², LIANG Bin²,
ZHANG Li¹, HOU Guofeng^{1*}

(1. Shaanxi Keyi Sunshine Test Services Co., Ltd., Xi'an Shanxi 710000; 2. Shaanxi Shengtang Dairy Co., Ltd., Weinan Shaanxi 711700)

基金项目: 渭南市重点研发计划项目-免疫功能性羊乳产品研发与示范 (2024ZDYFJH-790)

作者简介: 高星 (1990-), 女, 甘肃白银人, 硕士, 工程师, 研究方向为食品检测;

赵丹 (1992-), 男, 陕西宝鸡人, 本科, 工程师, 研究方向为乳制品检测;

张浩 (1991-), 男, 陕西渭南人, 本科, 助理工程师, 研究方向为食品检测;

屠锦娣 (1977-), 女, 陕西咸阳人, 本科, 高级工程师, 研究方向为食品、环境检测;

杨维静 (1991-), 女, 陕西渭南人, 本科, 工程师, 研究方向为乳制品生产质量安全;

梁斌 (1990-), 男, 陕西咸阳人, 硕士, 工程师, 研究方向为婴幼儿配方羊奶粉生产工艺;

张莉 (1957-), 女, 陕西西安人, 本科, 高级工程师, 研究方向为食品、环境检测。

***通信作者:** 侯国峰 (1988-), 男, 山西临汾人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为食品检测。

Abstract: [Objective] Compare and evaluate the application of ion chromatography and enzymatic colorimetry in the determination of choline in infant formula milk powder, and select a more suitable detection method for enterprise quality control. [Method] A comparative analysis between ion chromatography and enzymatic colorimetry was conducted by using indicators such as standard curves, detection limits, precision, accuracy, uncertainty assessment and determination costs. [Result] Both ion chromatography and enzymatic colorimetry demonstrated good linear relationships within their respective concentration ranges, with correlation coefficients (R^2) of 0.999 7 and 0.999 1, respectively. The detection limits and quantification limits of ion chromatography were 0.7 mg/100 g and 2.1 mg/100 g, while those of enzymatic colorimetry were 0.9 mg/100 g and 2.7 mg/100 g. The recovery rates of ion chromatography and enzymatic colorimetry ranged were 90.7%~102.7% and 86.0%~100.6% (with the spiked amount ranging from 3 mg/100 g to 150 mg/100 g), respectively. The precision of ion chromatography (0.61%~3.83%) was superior to that of enzymatic colorimetry (1.30%~5.85%). The expanded uncertainties for ion chromatography and enzymatic colorimetry were 4.02% and 4.04%, respectively. [Conclusion] Ion chromatography demonstrated comparable advantages over enzymatic colorimetry in terms of sensitivity, precision and cost. It is more suitable for both qualitative and quantitative analysis of choline in infant formula and is recommended as the primary method for enterprises determination.

Keywords: food testing; choline; ion chromatography; enzymatic colorimetry; infant formula

胆碱 (Choline) 是一种强有机碱性化合物, 在动物体内主要以游离态胆碱、乙酰胆碱、卵磷脂或鞘磷脂等形态存在^[1, 2]。作为一种重要的食品营养强化剂, 它对大脑发育、脂肪代谢、神经系统信息传递等具有重要作用, 尤其对胎儿的大脑发育至关重要^[3~9]。成人可通过摄入蛋黄、动物肝脏、豆制品等食物获取胆碱, 婴幼儿则主要依靠母乳或配方乳粉摄取。依据《GB 14880—2012 食品安全国家标准 食品营养强化剂使用卫生标准》, 婴幼儿配方乳粉中可添加800~1 500 mg/kg胆碱^[5], 且2023年2月22日实施的《GB 10765—2021 食品安全国家标准 婴儿配方食品》^[10]和《GB 10766—2021 食品安全国家标准 较大婴儿和幼儿配方食品》^[11]将婴儿配方乳粉1段和2段中的胆碱由可选择成分修改为必需成分^[8, 12]。这一变更凸显了选择准确、可靠、适用的胆碱检测方法的重要性, 是保障婴幼儿配方乳粉中胆碱检测质量控制的重要科学手段。

目前, 胆碱检测方法包括滴定法^[13]、酶比色法^[1, 14]、雷氏盐分光光度法^[15, 16]、离子色谱法^[17~21]、高效

液相色谱法^[22~24]、毛细管电泳法^[25, 26]、液质联用法^[27~30]、纳米传感器法^[31]等。然而, 各种检测方法均存在一定局限性, 如滴定法选择性较差、雷氏盐分光光度法操作繁琐、高效液相色谱法易受基质干扰、毛细管电泳法重复性差、液质联用法成本高、纳米传感器法成本与稳定性需优化等。

《GB 5413.20—2022 食品安全国家标准 婴幼儿食品和乳品中胆碱的测定》^[32]于2022年12月30日实施, 其中延用了酶比色法并新增了离子色谱法。考虑国内现状, 选择适用于生产企业、便于产品质量监控且能准确测定的方法尤为必要。本研究通过对比离子色谱法和酶比色法发现, 离子色谱法灵敏度高、重复性好、检测费用低, 更适用于婴幼儿食品和乳品中胆碱含量的测定。

1 试验方法

1.1 材料与试剂

胆碱 (CAS号87-67-2、纯度99.8%), 坛墨质检科技股份有限公司; 胆碱氧化酶 (CAS号9028-67-

5, ≥ 10 U/mg)、过氧化物酶(CAS号9003-99-0, ≥ 250 U/mg)、磷脂酶D(CAS号9001-87-0, ≥ 60 U/mg), 德国默克公司; C18固相萃取小柱(CAS号BWSI86500), 深圳逗点生物技术有限公司; 4-氨基安替比林(分析纯)、浓盐酸(分析纯), 国药集团化学试剂有限公司; 甲烷磺酸(色谱纯), 上海麦克林生化科技股份有限公司; I段婴儿配方羊乳粉、基粉, 陕西圣唐乳业有限公司。

1.2 仪器与设备

ICS-5000+DC离子色谱仪(配有电导检测器), 美国Thermo Fisher公司; VORTEX GENIE 2涡旋振荡器, 美国SI仪器公司; HH-6恒温水浴锅, 常州国华电器有限公司; 电子天平(感量为0.1 mg)、紫外分光光度计, 北京普析通用仪器有限责任公司; T6新世纪pH计, 梅特勒-托利多国际有限公司。

1.3 方法

1.3.1 样品前处理

(1) 离子色谱法
称取2.5 g样品(精确至0.001 g)于50 mL比色管中, 加入25 mL 1 mol/L的盐酸溶液, 加塞混匀。置于(70 $\pm$ 2)℃水浴中, 水解3 h(每隔30 min涡旋振荡1次), 冷却至室温, 转入50 mL容量瓶中, 用水定容至刻度, 混匀待用。C18固相萃取柱使用前依次用10 mL甲醇、15 mL水活化。取上述水解液15 mL过C18固相小柱, 弃去前3 mL, 收集后面洗脱液待测。

(2) 酶比色法

称取样品5 g(精确至0.001 g)混合均匀的样品于100 mL锥形瓶中, 加入1 mol/L的盐酸溶液30 mL, 加塞混匀。(70 $\pm$ 2)℃水浴, 水解3 h(每隔30 min涡旋振荡1次), 冷却至室温。用氢氧化钠溶液(500 g/L)调节pH值至3.5~4.0, 转入50 mL容量瓶中, 用水定容至刻度。用滤纸过滤水解液待测(若滤液不澄清可采用0.45 μ m水性滤膜针头滤器再次过滤); 准备3支比色管(A、B、C), A管加入

100.00 μ L水(用于测定试剂吸光值), B、C两管加入待分析溶液100 μ L, B管加入3.00 mL水(用于测定滤液吸光值), C管加入3.00 mL显色剂(用于测定总吸光值), 混匀, 将比色管置于(37 $\pm$ 2)℃水浴中保温反应15 min, 待测。

1.3.2 仪器条件

(1) 离子色谱法

色谱柱: IonPac CS12A(4 mm*250 mm); 保护柱: IonPac CG12A(4 mm*50 mm); 检测器: 电导检测器, 配阳离子抑制器; 淋洗液: 15 mmol/L甲烷磺酸溶液等度淋洗; 流速: 1.0 mL/min; 进样量: 100 μ L。

(2) 酶比色法

波长: 505 nm。

1.3.3 样品测定

按照前处理方法及仪器条件对标准品和样品中的胆碱含量进行测定。胆碱标准品及样品的离子色谱图见图1、图2。

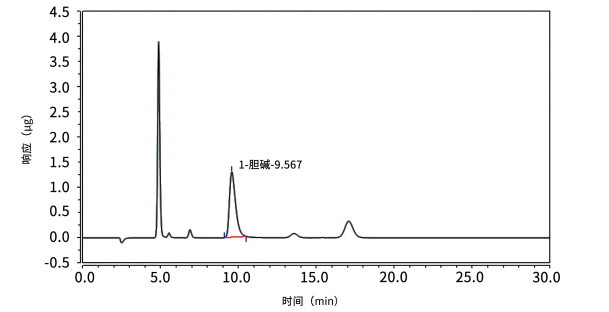


图1 4 mg/L 胆碱标准溶液的离子色谱图

Figure 1 Ion chromatogram of 4 mg/L choline standard solution

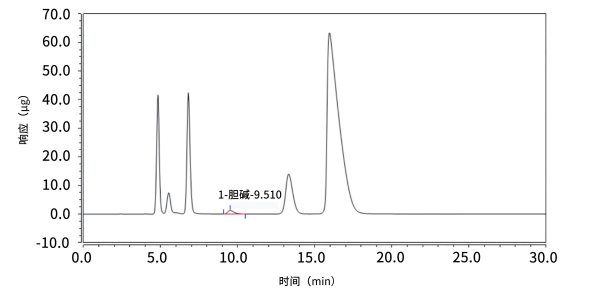


图2 婴儿配方乳粉中胆碱含量的离子色谱图

Figure 2 Ion Chromatogram of Choline Content in Infant Formula

2 结果与讨论

2.1 线性方程及检出限

配制浓度分别为0.16、0.32、0.80、2.40、3.20、4.00 mg/L的胆碱标准系列工作液进行离子色谱法检测，配制浓度分别为100.0、200.0、300.0、400.0、500.0、600.0 mg/L的胆碱标准系列工作液进行酶比色法检测。以样品浓度为横坐标（x，mg/L），以峰面积/吸光度为纵坐标（y）进行线性回归分析，试验结果见表1。结果表明，离子色谱法和酶比色法在各自范围内均呈良好的线性关系。离子色谱法的检出限和定量限分别为0.7 mg/100 g（3 倍信噪比）和2.1 mg/100 g，优于酶比色法（检出限为0.9 mg/100 g（3 倍空白标准偏差/斜率），定量限为2.7 mg/100 g）。且离子色谱法的灵敏度明显高于GB 5413.20—2022^[14]

的要求（离子色谱法检出限2 mg/100 g，酶比色法检出限1 mg/100 g）。

2.2 回收率和精密度

为评估离子色谱法与酶比色法的准确性和重复性，选取乳粉基粉进行4水平加标回收试验（加标量分别为3、30、80、150 mg/100 g），每组重复测定7 次，两种方法的回收率和精密度结果如表2、表3所示。

由表2、表3可知，离子色谱法的回收率（90.7%~102.7%）和精密度（0.61%~3.83%）均优于酶比色法（回收率86.0%~100.6%，精密度1.30%~5.85%）。在低加标量时（3 mg/100 g和30 mg/100 g），离子色谱法的回收率略高于酶比色法，且相对标准偏差更低。进一步对低加标量（3 mg/100 g）时离子色谱法和酶比色法测定样品

表 1 离子色谱法和酶比色法的线性方程、线性范围、相关系数、检出限及定量限

Table 1 Linear Equations, Linear range, Correlation Coefficient, Detection Limit and Quantification Limit of Ion Chromatography and Enzymatic Colorimetry

检测方法	线性方程	线性范围（mg/L）	R ²	检出限（mg/10 g）	定量限（mg/10 g）
离子色谱法	y=0.190 7x-0.013 6	0.16 ~ 4.00	0.999 7	0.7	2.1
酶比色法	y=0.004 11x-0.005 58	100 ~ 600	0.999 1	0.9	2.7

表 2 离子色谱法检测样品回收率和精密度数据

Table 2 Data on Recovery Rate and Precision of Sample Detection by Ion Chromatography

编号	加标量 (mg/10 g)	测定值 (mg/100 g)							回收率 (%)	相对标准 偏差 (%)
		1	2	3	4	5	6	7		
1	3	3.08	2.83	2.72	2.91	2.93	2.96	2.910	90.7 ~ 102.7	3.83
2	30	29.10	29.50	30.30	29.80	30.10	29.30	28.90	96.3 ~ 101.0	1.75
3	80	80.20	79.10	79.50	79.80	79.50	78.70	79.90	98.4 ~ 100.3	0.64
4	150	149.10	148.80	149.50	149.80	150.50	150.20	149.30	99.2 ~ 100.3	0.61

表 3 酶比色法检测样品回收率和精密度数据

Table 3 Data on Sample Recovery Rate and Precision for Enzymatic Colorimetric Method

编号	加标量 (mg/1 g)	测定值 (mg/1 g)							回收率 (%)	相对标准 偏差 (%)
		1	2	3	4	5	6	7		
1	3	2.65	2.87	2.99	2.58	2.83	2.64	2.59	86.0 ~ 99.7	5.85
2	30	28.00	28.30	27.60	27.50	28.00	29.80	27.20	90.7 ~ 99.3	3.04
3	80	76.50	77.80	79.60	78.20	77.90	77.60	80.50	95.6 ~ 100.6	1.38
4	150	148.30	150.20	149.30	146.90	150.60	147.90	149.20	97.9 ~ 100.4	1.30

的回收率进行独立样本t检验（方差齐性假设通过Levene检验， $P>0.05$ ），结果显示两组回收率差异显著 $[t(12)=2.315, P=0.039]$ ，离子色谱法的回收率显著高于酶比色法。高加标量时（80 mg/100 g 和 150 mg/100 g），离子色谱法与酶比色法回收率相当、但是相对标准偏差更低。

综上所述，离子色谱法在不同加标量水平下均表现更优的回收率和更佳的重复性，其在低加标量水平下的优势（高回收率、低相对标准偏差）尤其突出。说明该方法具有更高的准确性和可靠性，更优的抗干扰能力（由不同人员操作时，更易保持性能一致性，降低培训与验证成本），表现出更优秀的方法适用性。因此，在实际检测场景中，可优先采用离子色谱法。

2.3 婴儿配方乳粉样品测定

选择陕西圣唐乳业有限公司生产的 I 段婴儿配方羊乳粉，分别采用离子色谱法和酶比色法进行测定，结果见表4。

由表 4 可知，离子色谱法的回收率为 99.2%~100.4%，相对标准偏差为0.48%；酶比色法的回收率为99.0%~100.5%，相对标准偏差为0.87%。结果表明，离子色谱法和酶比色法对于婴儿配方乳粉胆碱的检测均能得到比较准确结果，但离子色谱法的精密度略高于酶比色法。

2.4 不确定度

本研究的不确定度来源主要包括：测量重复性（标准偏差）、仪器精度（电子天平、容量器具等）、标准品纯度、人员操作误差、数据处理偏差等。为系统评估两种检测方法的可靠性，本研究重点从由重复性测量产生的A类不确定度和标准品纯度、称样量（电子天平）、称量体积（容量瓶和移液管）引入的B类不确定度关键分量对两种检测方法的不确定度进行分析，结果见表5。

结果表明，离子色谱法的扩展不确定度与酶比色法相当，分别为4.02%和4.04%。离子色谱法重复性引入的不确定度低于酶比色法，但样品转移步骤较多、导致其称量体积引入的不确定度略高，但两者的差异对整体不确定度的影响有限。

2.5 检测成本

酶比色法试验所用的主要试剂为胆碱氧化酶、过氧化物氧化酶、磷脂酶D，离子色谱法试验使用的主要耗材为C18固相萃取小柱，忽略部分费用较小的试剂耗材，酶比色法和离子色谱法检测胆碱单批次的成本分别为1 419 元和120 元，见表6。离子色谱法的单次检测成本较低，但离子色谱仪需要一次性购置投入，且存在离子色谱仪、色谱柱、其他附件的维护费用。相比之下，酶比色法所需的设备相对简单，主要为分光光度计，价格较低廉，具有

表 4 离子色谱法和酶比色法检测 I 段婴儿配方羊乳粉中胆碱结果对比
Table 4 Comparison of Choline Determination Results Obtained by Ion Chromatography and Enzymatic Colorimetry for Stage I Infant Formula Goat Milk Powder

方法	标示值 (mg/10 g)	测定值 (mg/10 g)							回收率(%)	相对标准 偏差 (%)
		1	2	3	4	5	6	7		
离子色谱法	124.1	124.1	123.5	123.7	124.6	123.8	123.6	123.1	99.2 ~ 100.4	0.48
酶比色法	124.1	123.6	123.1	123.2	124.7	125.2	122.9	123.5	99.0 ~ 100.5	0.87

表 5 离子色谱法和酶比色法各因素引入的不确定度分析
Table 5 Uncertainty Analysis of Factors Introduced by Ion Chromatography and Enzymatic Colorimetry Method

检测方法	重复性引入的不 确定度 (%)	标准品纯度引入 的不确定度 (%)	称样量引入的 不确定度 (%)	称量体积引入 的不确定度 (%)	合成不确 定度 (%)	扩展不确 定度 (%)
离子色谱法	0.14	2.0	0.023	0.048	2.01	4.02
酶比色法	0.29	2.0	0.023	0.041	2.02	4.04

表 6 离子色谱法和酶比色法检测成本对比

Table 6 Comparison of Determination Costs between Ion Chromatography and Enzymatic Colorimetry

检测方法	主要耗材	CAS 号	规格	价格 (元)	可用次 数(次)	单批次检测 费用(元)	合计单批次 费用(元)
酶比色法	胆碱氧化酶	9028-67-5-	1 KU	5 500	7	786	1 419
	过氧化物酶	9003-99-0-	1 g	3 500	15	233	
	磷脂酶 D	9001-87-0-	25 KU	4 000	10	400	
离子色谱法	C18 固相萃 取小柱	BWSI86500	1 盒(20 支)	600	5	120	120

普适性。虽然离子色谱法的初始设备投入较大，但从长远角度来看，其单批次检测成本低、精度高、可靠性强，更适用于检测通量高、注重长期效益的大规模生产企业。

3 结论

本研究依据评估标准曲线、检出限、回收率、精密度、不确定度以及检测成本等关键指标，综合比较分析离子色谱法与酶比色法在婴幼儿配方乳粉胆碱检测中的应用。试验结果显示，离子色谱法在灵敏度、精密度及成本效益方面均表现出较酶比色法更优的性能，因此推荐其作为企业的首选检测方法。

参考文献

[1] 张琳, 贾俊, 曲玉超, 等.用改良的酶比色法测定婴幼儿乳粉中胆碱的含量[J].食品安全导刊, 2019 (27): 70-71.

[2] 田芳, 毛颖异, 李翔.母乳及婴幼儿配方乳粉中水溶性胆碱的检测及比对研究[A].中国食品科学技术学会, 中国食品科学技术学会第十九届年会论文摘要集[C].雅培营养品上海研发中心, 2022.

[3] Buchman A L.Choline deficiency during parenteral nutrition in humans[J].Nutriton in Clinical Practice, 2003, 18 (5): 353-358.

[4] 鲍雷, 蔡夏夏, 李勇.胆碱与婴幼儿大脑发育[J].中国生育健康杂志, 2014, 25 (4): 379-382.

[5] 中华人民共和国卫生部.GB 14880—2012 食品安全国家标准 食品营养强化剂使用标准[S].

[6] 宋雨, 吴迪, 张璐, 等.胆碱肠内代谢对肠道菌群及宿主内稳态生理指标的影响[J].食品科学, 2025, 46 (4): 126-135.

[7] 李荣荣.基于响应面解析蛋氨酸、胆碱和烟酰胺对奶牛肝细胞脂代谢的影响[D].咸阳: 西北农林科技大学, 2024.

[8] 陈珺.氯化胆碱对鳙脂肪代谢的影响机制研究[D].武汉: 武汉轻工大学, 2024.

[9] 中国食品科学技术学会.生命早期1 000 天大脑发育与营养科学证据[J].中国食品学报, 2023, 23 (10): 403-419.

[10] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局.GB 10765—2021 食品安全国家标准 婴儿配方食品[S].

[11] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局.GB 10766—2021 食品安全国家标准 较大婴儿和幼儿配方食品[S].

[12] 刘飒娜, 刘怡彤, 屈鹏峰, 等.2017—2022年中国市售婴儿配方乳粉必需成分含量与新国标比较研究[J].卫生研究, 2023 (3): 394-398.

[13] 刘丹, 张康逸, 黄健花, 等.非水电位滴定法测定甘油磷脂酰胆碱[J].中国油脂, 2012, 37 (3): 82-84.

[14] 崔梦琪, 罗璇, 姜湘琴, 等.微波辅助水解/酶比色法快速测定特殊医学用途配方食品中胆碱[J].食品与发酵科技, 2024, 60 (6): 131-136.

[15] 赵红霞, 郝万清.雷氏盐比色法检测婴幼儿配方乳粉中胆碱含量[J].乳业科学与技术, 2012, 35 (2): 41-43.

[16] 尹凤芝, 张慧.婴幼儿食品和乳品中胆碱的测定——雷氏盐分光光度法[J].生命科学仪器, 2013, 11 (1): 54-57.

[17] 顾秀英, 欧菊芳, 杨琳, 等.离子色谱法测定奶粉中胆碱质量分数[J].中国乳品工业, 2011, 39 (7): 47-49.

[18] 武中平, 高巍, 卢剑.离子色谱法测定婴幼儿配方奶粉中胆碱的含量[J].乳业科学与技术, 2011, 34 (5): 232-233.

[19] 黄琬淳, 张敬锴, 张桂娜, 等.离子色谱法测定不同基质样品中胆碱含量[J].中国食品工业, 2024 (23): 98-100.

[20] 刘金梅, 丁玉珍, 葛城, 等.微波消解-离子色谱法测定婴幼儿配方食品中胆碱[J].食品工业, 2023, 44 (7): 313-316.

[21] 刘美霞, 胡彩霞, 任丽, 等.离子色谱法测定奶粉中胆碱含量方法的研究[J].食品安全质量检测学报, 2013, 4 (6): 1880-1884.

[22] 刘雪梅, 刘波, 郭园, 等.高效液相色谱-蒸发光散射检测器

联用法测定婴幼儿配方乳粉中胆碱的含量[J].中国食品卫生杂志, 2016, 28 (2) : 219-223.

[23] 张玉, 汪庆旗, 梁晶晶, 等.超高效液相色谱-荧光法测定婴幼儿乳粉中胆碱含量[J].中国卫生检验杂志, 2017, 27 (2) : 169-171.

[24] 高士达, 关福晶, 李明辉, 等.基于离子液体的反相液相色谱法检测胆碱和四甲基铵[J].分析科学学报, 2023, 39 (2) : 171-176.

[25] Inoue T, Kirchhoff J R, Hudson R A.Enhanced measurement stability and selectivity for choline and acetylcholine by capillary electrophoresis with electrochemical detection at a covalently linked enzyme-modified electrode[J].Analytical Chemistry, 2002, 74 (20) : 5321-5326.

[26] 丁晓静, 田绪, 李疆, 等.毛细管区带电泳-间接紫外检测法测定婴儿配方奶粉中的胆碱[J].食品安全质量检测学报, 2018, 9 (10) : 2298-2303.

[27] 高进, 赵静, 唐澈, 等.高效液相色谱-高分辨质谱-同位素内标法测定乳粉中的胆碱[J].食品安全质量检测学报, 2018, 9 (20) : 5370-5375.

[28] Liu J, Zhao M, Zhou J, et al.Simultaneous targeted analysis of trimethylamine-N-oxide, choline, betaine, and carnitine by high performance liquid chromatography tandem mass spectrometry[J].Journal of chromatography.B, Analytical technologies in the biomedical and life sciences, 2016 (1035) : 42-48.

[29] 王荣艳, 斯菲菲, 陈青俊, 等.酸水解法提取-高效液相色谱-质谱法测定乳粉中胆碱的含量[J].理化检验-化学分册, 2023, 59 (8) : 948-952.

[30] 詹胜群, 葛城, 刘金梅, 等.超高效液相色谱-串联质谱-同位素标记-酸水解法同时测定婴配奶粉中胆碱和左旋肉碱[J].食品与发酵工业, 2023, 49 (24) : 302-311.

[31] Li M , Luo M , An J ,et al.Choline electrochemical biosensor based on MWCNT-AuNPs and MWCNT-PANI composite nanomaterials [J]. Microchemical Journal, 2025:213. DOI:10.1016/j.microc.2025.113609.

[32] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局.GB 5413.20—2022 食品安全国家标准 婴幼儿食品和乳品中胆碱的测定[S].